

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE CRUDO DE PALMA (*Elaeis guineensis*), PARA SU USO COMO FASE CONTINUA EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN

PRODUCTION OF BIODIESEL FROM CRUDE PALM OIL (*Elaeis guineensis*), TO BE USED AS A CONTINUOUS PHASE IN DRILLING FLUIDS

Rubén D. Vega M., Rocielys del V. Muñoz D., Yexander J. Chettick S.

Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (EICA)

Departamento de Ingeniería de Petróleo, Venezuela

rvegas@udo.edu.ve

(Recibido el 04 de enero 2021, aceptado para publicación el 05 de julio 2021)

RESUMEN

El uso de aceites como fase continua en fluidos de perforación conllevó al desarrollo de un fluido a partir de aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis*). Para ello, fue necesario aplicar un proceso de transesterificación para obtener un éster o biodiésel. Al ser caracterizado, este cumplió con la norma ASTM B100, excepto por la viscosidad cinemática (6,38 cSt), la cual superó el valor máximo regulado. Asimismo, presentó un espectro IR típico de un biodiésel de palma lo que confirmó la calidad del biodiésel obtenido aplicando metanólisis ácida y básica. Seguidamente, se formuló un fluido de perforación con una densidad de 1437,92 kg/m³ y se sometió a un proceso de envejecimiento dinámico a 121,1 °C (250 °F) y 1,38 MPa (200 psi). El fluido resultante demostró tener mejores propiedades físicas que fluidos de igual densidad como el Vassa y el gasoil. Finalmente, se estudió su comportamiento al reducir e incrementar la temperatura en 27,7°C con respecto a la temperatura de envejecimiento inicial, presentando un funcionamiento ideal a las menores temperaturas (93,3 y 121,1 °C), pero una degradación térmica a 148,8 °C, lo que lo convierte en no funcional a esa temperatura.

Palabras Clave: Fase Continua, Transesterificación, Biodiésel, Propiedades Físicas, Degradación Térmica.

ABSTRACT

The use of oils as a continuous phase in drilling fluids led to the development of a fluid from crude palm oil (*Elaeis guineensis*). For this, it was necessary to apply a transesterification process to obtain an ester or biodiesel. When characterized, it complied with the ASTM B100 standard, except for the kinematic viscosity (6.38 cSt), which exceeded the maximum regulated value. Likewise, it presented a typical IR spectrum of a palm biodiesel, which confirmed the quality of the biodiesel obtained by applying acid and basic methanolysis. A drilling fluid with a density of 1437.92 kg / m³, was then formulated and subjected to a dynamic aging process at 121.1 °C (250 ° F) and 1.38 MPa (200 psi). The resulting fluid was shown to have better physical properties than fluids Vassa and diesel of equal density. Finally, its behavior was studied by reducing and increasing the temperature by 27.7 ° C with respect to the initial aging temperature, presenting an ideal operation at the lowest temperatures (93.3 and 121.1 °C), but a thermal degradation at 148.8 °C, which makes it non-functional at that temperature.

Keywords: Continuous Phase, Transesterification, Biodiesel, Physical Properties, Thermal Degradation.

1. INTRODUCCIÓN

Un biodiésel es un combustible constituido por monoalquil ésteres provenientes de ácidos grasos de cadena larga, originados de aceites vegetales o grasas animales. Para su producción se emplea comúnmente el método de transesterificación, el cual consiste en hacer reaccionar un alcohol con los triglicéridos de las grasas y aceites naturales para producir ésteres [1], [2]. El biodiésel es un combustible alternativo que disminuye substancialmente la emisión de la mayoría de gases y partículas contaminantes de la atmósfera [3], igualmente reduce en un 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados y entre el 75% - 90% en los hidrocarburos aromáticos, con un contenido de 11% de oxígeno en peso y un 0% de azufre [4].

La producción industrial de biodiésel y su tecnología es un tema que a nivel mundial se conoce desde hace más de 50 años [5]. La transesterificación de aceites vegetales con alcoholes ha sido examinada utilizando diversas materias primas en búsqueda principalmente, de sustitutos energéticos de los derivados del petróleo [3]. Sin embargo, la práctica común en los países precursores ha sido utilizar aceites vegetales autóctonos, tales como aceites de semillas de oleaginosas de girasol y la colza (Austria, Alemania y otros países de Europa Central), aceite de Soya (Unidos de Norteamérica y Argentina) y aceite de palma aceitera (Malasia e Indonesia) [6].

La ventaja del aceite de palma es que es uno de los principales aceites que se comercializan en el mundo, y es más

económico que el aceite de canola, de soya o de colza. Esta ventaja permite reducir el costo de la producción de biodiesel [7]. El aceite de palma se extrae del mesocarpio del fruto de la semilla de la palma africana (*Elaeis guineensis*) a través de procedimientos mecánicos. Está constituido por una mezcla de ésteres de glicerol (triglicéridos) y es fuente natural de carotenos y vitamina E [8].

En Venezuela para los años 1984-2005, la palma aceitera tuvo una superficie promedio de cultivo de 15 162 ha, con un rendimiento de 10 937 kg/ha, representando el 44,4% de los textiles y oleaginosas producidas por el país, por lo que se le consideraba un cultivo líder [9].

La transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con alcoholes ha sido examinada utilizando diversas materias primas en búsqueda, principalmente, de sustitutos energéticos de los derivados del petróleo [3]. Generalmente, la transesterificación de triacilglicéridos se lleva a cabo con metanol o etanol en presencia de catalizadores básicos homogéneos, tales como hidróxidos de sodio o potasio, carbonatos o alcóxidos [10]

El empleo de estos sistemas catalíticos presenta algunos inconvenientes tales como dificultad en la eliminación de los catalizadores básicos después de la reacción, la producción de una gran cantidad de aguas residuales y la emulsificación asociada a la producción de jabón, especialmente si se utiliza etanol [11].

Actualmente, también se utiliza el método de catálisis heterogénea en reacciones de transesterificación, la cual impide la indeseable saponificación, permite la simplificación del proceso y ofrece una disminución de los costos de procesamiento al eliminar los pasos adicionales requeridos por los catalizadores homogéneos [12].

Estudios recientes orientan esfuerzos para la producción de biodiesel, pero para ser usados como fase continua en los fluidos de perforación [4], [13], [14]. La evolución de los fluidos de perforación desde sus inicios (agua y arcilla) hasta nuestros tiempos, ha conllevado el uso de aceites como fase continua. Generalmente, el aceite que se utiliza es el diésel o aceites minerales de origen hidrocarburo, pero son contaminantes al medio ambiente [4]. Por esta razón, a principios de la década de los noventa se hicieron esfuerzos por reducir el impacto sobre el medio ambiente de los fluidos base diésel, mediante la sustitución de éstos por otros fluidos a base aceite sintético y a base aceite mineral [14].

El componente primordial que hace que los fluidos como el diésel y los aceites minerales sean contaminantes se debe a la presencia de aromáticos o hidrocarburos cíclicos derivados del Benceno y su presencia en ellos se mide a través del punto de Anilina. Ya que el contenido relativo de aromáticos de un aceite o hidrocarburo se caracteriza por su punto de Anilina y los hidrocarburos con alto contenido de aromáticos tienen un bajo punto de Anilina y viceversa [15]. De esta manera, se considera que cuando el punto de Anilina es mayor a 60 °C se tiene una muestra baja en aromáticos. Así, el diésel y el aceite mineral Vassa, el cual es la principal base para fluidos de perforación en Venezuela poseen puntos de Anilina de 58,13°C [15] y 70 °C [16], respectivamente.

Ante lo descrito, la presente investigación pretendió producir un biodiesel a partir de un aceite crudo de palma aceitera, aplicando conjuntamente los métodos de metanólisis básica y metanólisis ácida en el proceso de transesterificación, para luego formular un fluido de perforación base aceite y verificar su uso mediante el análisis de sus propiedades físicas.

2. METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio de perforación de la Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. El aceite crudo de palma fue donado por la empresa POLAR, C.A y los aditivos para la formulación de los fluidos por la empresa Samán Tecnología Industrial en Petróleo.

2.1 Caracterización del biodiesel de palma aceitera

Para la obtención del biodiesel fue necesario aplicar un proceso de desgomado ácido al aceite con el fin de reducir las gomas insolubles y solubles en agua, es decir, la cantidad de fosfátidos y fosfolípidos en el aceite. Se aplicó el procedimiento del trabajo “Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiésel” [17] con la adición de la metanólisis ácida y una variación en el montaje del reactor según disponibilidad de materiales en el laboratorio. Las fases del proceso se muestran en la Figura 1.

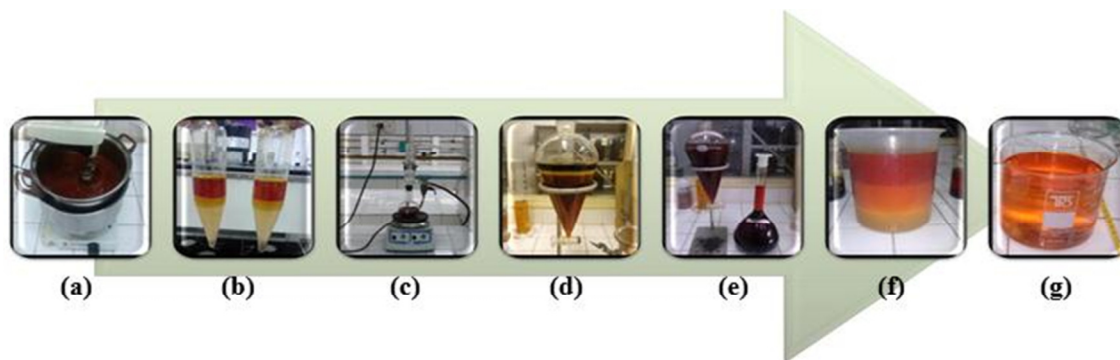


Figura 1: Proceso de elaboración del biodiésel: a) desgomado, b) neutralización del pH, c) reactor, d) metanólisis ácida, e) metanólisis básica, f) lavado, g) secado.

El proceso de degomado consistió en pesar 500 g de aceite crudo de palma y calentarlo entre 80°C – 90°C en baño térmico. Luego se le agregó 2% de agua a 80°C y entre 2-5% de ácido fosfórico, se agitó y calentó a 80°C, para dejarlo reposar y secar en un horno. La metanólisis ácida consistió en calentar el aceite degomado y neutralizado a 60°C y para agregarle ácido sulfúrico y metanol, posteriormente se dejó reaccionar manteniendo la agitación. La metanólisis básica inició con la preparación del metóxido disolviendo 0,35 g de NaOH en metanol. Luego se agregó a la mezcla obtenida de la transesterificación ácida y posteriormente se dejó reaccionar, reposar y separar.

Obtenido el biodiésel, este fue sometido a un estudio de Espectroscopia de Infrarrojo (IR) de Transformada de Fourier utilizando un equipo Perkin Elmer FTIR 1600, lo que permitió conocer su composición. Además, se le determinaron las propiedades físicas: índice de acidez [18], viscosidad cinemática [19], densidad por el método del picnómetro y densidad API usando el método del hidrómetro [20], punto de inflamación por el método de la copa abierta Cleveland [21] y la destilación del biodiésel [22]. Tomando en cuenta, estas propiedades se comparó el biodiésel obtenido a partir del aceite crudo de palma con los rangos establecidos para biodiésel [20].

2.2 Análisis de las propiedades físicas del fluido de perforación

Posteriormente se preparó un fluido de perforación tomando como fase continua el biodiésel obtenido; para su formulación se seleccionaron los aditivos en cantidades adecuadas a la densidad de 1437,92 kg/m³ [14] (Tabla 1). Luego de ser sometido a un proceso de envejecimiento dinámico (121,1 °C (250 °F) y 1,38 MPa (200 psi)), se le determinaron las propiedades físicas: viscosidad plástica, punto cedente, geles (10 s y 10 min) y filtrado, las cuales se rigieron por el manual de procedimientos estándar para la evaluación de fluidos de perforación base aceite, Norma API 13B-1 [23].

TABLA 1 - ADITIVOS Y CANTIDAD EMPLEADOS EN LA FORMULACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN DE 1437,92 kg/m³

Aditivo	Unidad	Cantidad
Aceite natural	cm ³	278,57
Arcilla organofílica	g	8,0
Humectante	cm ³	2,0
Cal hidratada	g	8,0
Controlador de filtrado	g	8,0
Densificante (Barita)	g	235,85

Las propiedades fueron validadas con el cumplimiento de los rangos operacionales establecidos para las propiedades de un fluido 100% aceite con una densidad de 1437,92 kg/m³ (Tabla 2) [24].

TABLA 2 - RANGOS OPERACIONALES ESTABLECIDOS PARA LAS PROPIEDADES DE UN FLUIDO 100% ACEITE CON UNA DENSIDAD DE 1437,92 kg/m³

Propiedad	Unidad de medida	Rango
Viscosidad plástica	Pa.s	0,013-0,0026
Punto cedente	Pa	5-10
Gel 10 s	Pa	2-3,5
Gel 10 min	Pa	3,5-6
Filtrado (AP-AT)	cm ³ / 30min.	≤ 6

Adicionalmente se formularon dos fluidos con las mismas concentraciones, empleando como fase continua aceite Vassa en uno y gasoil en el otro e igualmente se sometieron al procedimiento de envejecimiento dinámico y se les midieron las mismas propiedades físicas. La formulación de los tres fluidos permitió la comparación estadística de las propiedades mediante la aplicación de la prueba estadística no paramétrica de Friedman, la cual dejó conocer que si existían diferencias estadísticas significativas entre las propiedades de los fluidos. Para el estudio estadístico se realizaron tres repeticiones a cada propiedad analizada y se empleó el software InfoStat versión gratuita.

2.3 Efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas del fluido de perforación

Finalmente, se conoció el efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas del biodiésel cuando éste fue sometido a envejecimiento dinámico a 93,3 °C (200°F), 121,1 °C (250°F), 148,8 °C (300°F) y 1,38 MPa (200 psi), se estudiaron las variaciones de las propiedades físicas viscosidad plástica, punto cedente, geles y filtrado, que igualmente se rigieron por el Manual de Procedimientos Estándar para la evaluación de fluidos de perforación base aceite, Norma API 13B-1 [23].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El aceite crudo de palma poseía un color naranja con tonos ligeramente rojizos debido a su alto contenido de carotenos (Figura 2a), principalmente betacaroteno (provitamina A), alfa-caroteno y licopeno, además contiene una relación balanceada entre ácidos grasos saturados y monoinsaturados, por lo que su apariencia es semisólida a temperatura ambiente [8]. Una vez formulado el biodiésel éste visualmente era de color naranja, traslucido, limpio y a temperatura ambiente fluía como líquido (Figura 2b).

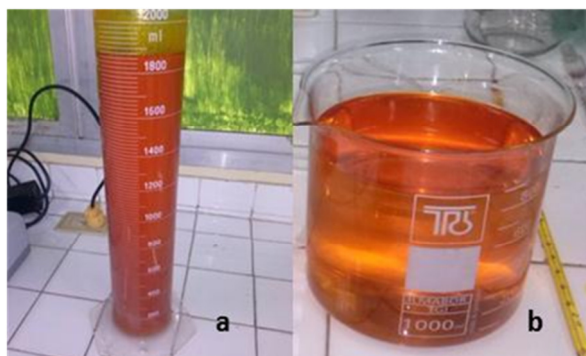


Figura 2: a) Aceite crudo de palma, b) Biodiésel obtenido.

El espectro del biodiesel de palma permitió visualizar los grupos funcionales que lo constituyen (figura 3). Se observa, en 3010 cm^{-1} un pico indicativo de un alargamiento oleofínico carbono-hidrogeno (C-H). En 2923 y 2853 cm^{-1} existe la presencia de señales características de estiramiento de enlaces carbono-hidrógeno (C-H) alifáticos asimétrico y simétrico respectivamente. En 1743 cm^{-1} un pico característico de los grupos carbonilos o alargamiento carbonílico de tipo éster (C=O) que concuerda con la presencia de triglicéridos.

Por otro lado, las señales moderadas que se notan en 1378 y 1460 cm^{-1} son propias de la flexión de enlaces tipo alcano CH_3 y CH_2 respectivamente (alargamiento C-O), confirmando la presencia de cadenas alifáticas, esperadas para los triglicéridos de ácidos grasos. La ausencia de una banda ancha entre 2400 - 3500 cm^{-1} , indicó la ausencia de señales de estiramiento de enlaces oxígeno-hidrógeno, correspondiente a ácidos carboxílicos, lo que sugiere que la muestra presenta una baja acidez. Entre 1000 y 1300 cm^{-1} , se percibe en la zona de huella dactilar enlaces carbono-oxígeno (C-O).

El espectro obtenido coincide con el espectro mostrado para biodiésel de aceite de palma logrado por catálisis heterogénea [3], con diferencias solo en la altura de absorbancia producto del método, tiempo de agitación y químicos empleados.

En el biodiésel de palma los triacilglicéridos pueden variar en el número de carbono presentes en la cadena de ácidos grasos (longitud de la cadena) y en la estructura (presencia de dobles enlaces e insaturaciones). Dichas variaciones son las que definen gran parte de las propiedades físicas y químicas del biodiésel de palma [8]. En la Tabla 3, se exhiben los valores obtenidos para las propiedades en estudio y los rangos que debe cumplir un biodiésel según la norma aplicada [20] para conocer la calidad del producto elaborado.

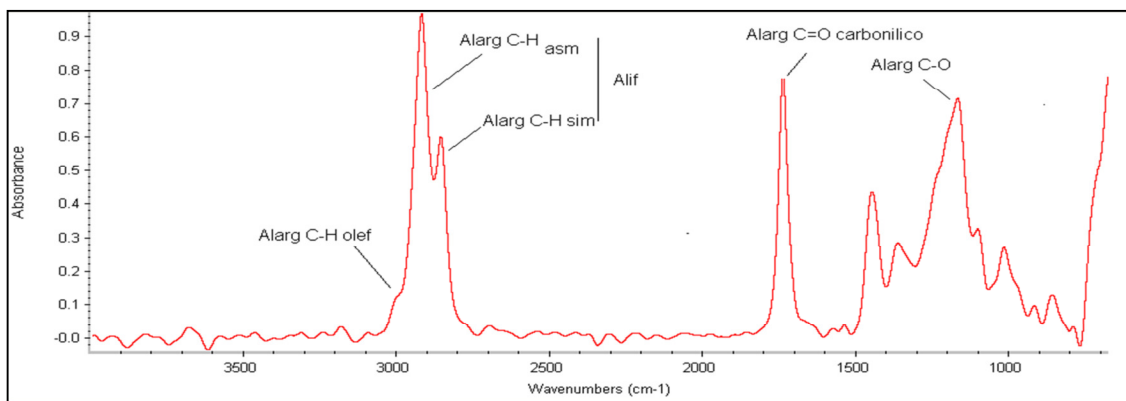


Figura 3: Espectroscopia de Infrarrojo (IR) del biodiesel obtenido.

TABLA 3 - PROPIEDADES DE LA ASTM B100 PARA EL BIODIÉSEL

Prueba	Unidad	Valor obtenido	Rango establecido por ASTM para Biodiésel 100
Índice de acidez	mg NaOH/g	0,44	0,5 Max.
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt	6,38	1,9 – 6,0
Densidad a 15°C	kg/m ³	865,1	Reportar
Punto de inflamación	°C	170	130 Min.
Punto de combustión	°C	188	-
Destilación temperatura inicial	°C	270	-
Destilación temperatura máxima	°C	326	360 Max
Destilación temperatura final	°C	265	-
Volumen inicial	mL	100	-
Volumen recuperado	mL	92	-
Residuo	mL	5	-
Pérdidas por evaporación	mL	3	-

El biodiésel generado a partir de aceite crudo de palma tuvo un grado de acidez de 0,44 mg NaOH/g, el cual es menor al máximo establecido para el biodiésel por la norma ASTM [20], demostrando la efectividad del proceso referente a la cantidad de ácidos grasos libres que están presentes en el aceite y que precisamente por estar libres ya no forman parte de los triglicéridos; coincidiendo además con lo reflejado en la espectroscopia de infrarrojo (IR). Este valor fue inferior al 1,2 mg NaOH/g obtenido en un biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea [25], ratificando la efectividad del proceso realizado.

La viscosidad para el biodiésel fue de 6,38 cSt a 40°C (Tabla 3), siendo superior al valor máximo establecido por la norma [20] de 6 cSt, lo que afecta la fluidez del fluido, tampoco coincide con el valor de 5,4 cSt de otro biodiésel de palma aceitera [17]. Pero en el caso de la aplicación del biodiésel de palma en fluidos de perforación se considera que posiblemente sea ventajoso ya que mejoraría la capacidad de acarreo de sólidos.

El valor de densidad 872,9 kg/m³ a 15°C presentado por el biodiésel de aceite crudo de palma [17], fue superior al obtenido en el presente trabajo 865,1 kg/m³, aunque ambos valores están por debajo del parámetro de referencia (agua) 999,19 kg/m³ (en este caso a 15°C), siendo esto lo esperado. La densidad del biodiesel es una propiedad de vital importancia para la densidad final del fluido de perforación cuando se aplique el balance de materiales, debido a que la cantidad de agregado de los distintos aditivos para lograr la densidad deseada dependerá de ella.

Los puntos de inflamación y combustión obtenidos fueron de 170 °C y 188 °C respectivamente. El punto de inflamación cumple con el valor establecido por la norma [20] (130 °C mínimo), y con respecto al punto de combustión, la citada norma no establece ningún valor límite. Igualmente, se ha referenciado un valor de punto de inflamación de 162,3 °C [17], el cual es menor al biodiésel en estudio. Este aspecto genera una ventaja al biodiesel producido, porque los líquidos inflamables son más peligrosos cuanto más bajo es su punto de inflamación. En la industria petrolera se recomiendan valores de puntos de inflamación y combustión igual o por encima a 76,7 °C (170°F) y 82,2 °C (180°F) respectivamente, para reducir riesgos de incendios en el taladro [26].

La destilación del biodiésel aportó datos importantes de su comportamiento al aplicarle temperatura, de igual manera se pudo apreciar los puntos críticos bajo el parámetro. La temperatura del punto inicial de ebullición fue de 270 °C (Figura

4), siendo un ejemplo de que el biodiesel obtenido posee una pureza aceptable, producto de no contener cantidades apreciables de metanol ni de agua, porque en caso contrario las temperaturas y rangos de ebullición serían inferiores a las obtenidas.

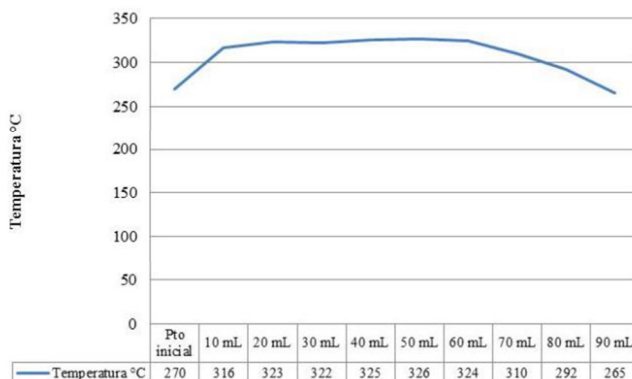


Figura 4: Curva de temperatura de destilación del biodiésel de palma aceitera.

El intervalo de ebullición para el biodiésel en la curva de destilación es más reducido que para el diésel mineral [17]. Asimismo, los autores expresan que tal comportamiento refleja el hecho de que los metilésteres producidos a partir de los diferentes ácidos grasos presentes en los triglicéridos no son diferentes unos de otros, en oposición a la amplia variedad de hidrocarburos presentes en el diésel de origen fósil (hidrocarburos alcanos normales y ramificados, cicloalcanos y aromáticos simples y condensados), los cuales pueden poseer volatilidades muy diferentes.

Formulado el fluido de perforación, éste mostró propiedades físicas dentro del rango de aceptación establecido (Tabla 4). La viscosidad plástica presentó un valor de 0,022 Pa.s, esto es concordante con los obtenidos para la propiedad para fluidos desarrollados con biodiésel comerciales de palma aceitera (0,024 Pa.s) y soya (0,023 Pa.s) [14]. En términos generales, el aceite disminuye el peso del fluido y aumenta la viscosidad plástica, de ahí lo expresado con respecto a la densidad obtenida, por lo que la densidad del biodiésel elaborado debió ser menor a la de los biodiésel de comparación.

TABLA 4 - VALOR PROMEDIO DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN DE 1437,92 kg/m³

Propiedad	Unidad de medida	Valor promedio	Rango
Viscosidad plástica	Pa.s	0,022	0,013-0,0026
Punto cedente	Pa	6	5-10
Gel 10 s	Pa	2,5	2-3,5
Gel 10 min.		4	3,5-6
Filtrado (AP-AT)	cm ³ /30min.	3	≤ 6

El punto cedente medido fue de 6 Pa, siendo coherente para el valor de la propiedad reportado para fluidos con biodiésel comerciales de palma aceitera y soya de 7 Pa y 5,5 Pa respectivamente [14]. Los esfuerzos gel encontrados para 10 s y 10 min fueron de 2,5 Pa y 4 Pa, mientras que los del fluido de palma y soya comercial fueron de 3 Pa - 5,5 Pa y 3 Pa - 4 Pa respectivamente. El punto cedente y el esfuerzo de gel son medidas de las fuerzas de atracción, con la diferencia de que el punto cedente está referido a las condiciones dinámicas y el esfuerzo de gel a las condiciones estáticas.

El filtrado obtenido presentó un valor de 3 cm³/30 min para el fluido formulado, mientras que los fluidos comerciales reportaron valores de 10 cm³/30 min para el fluido con biodiesel de palma comercial y 6 cm³/30 min para el biodiésel de soya comercial. El filtrado indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables cuando el fluido es sometido a una presión diferencial, por lo que se detalla que el fluido formulado mejoró esta propiedad respecto a los biodiesel comerciales.

Los valores de las propiedades físicas medidas se asemejan más a los valores reportados para el fluido con biodiésel de soya comercial en vez del fluido con biodiésel de palma aceitera comercial [14]. Cabe destacar, que el biodiesel de soya presentó en el citado trabajo mejores propiedades físicas para fluidos con 1198,27 kg/cm³ (10 lpg), 1437,92 kg/m³ (12 lpg) y 1797,4 kg/cm³ (15 lpg) [14], lo cual les permitió concluir que era el fluido ideal para sustituir al aceite Vassa o al

diésel. Esto es un indicativo del que el proceso empleado para obtener el biodiésel mejoró sus condiciones para ser empleado como fluido de perforación.

Respecto a fluidos de perforación con Vassa, diésel y biodiésel de palma aceitera, la viscosidad plástica obtenida se observa en la Tabla 5. En ella se detalla que los valores de la propiedad oscilaron entre 0,015 Pa.s y 0,023 Pa.s.

TABLA 5 – VALORES PROMEDIOS DE LA VISCOSIDAD PLÁSTICA PARA LOS FLUIDOS FORMULADOS A 1437,92 kg/m³, CON FASES CONTINUAS DE ACEITE VASSA, DIESEL Y BIODIÉSEL

Propiedad	Vassa	Diésel	Biodiésel
Viscosidad plástica (Pa.s)	0,015	0,023	0,022

Al comparar estadísticamente se precisa que el fluido Vassa (letra A), presentó diferencias estadísticas significativas (letra distintas) (Figura 5) y con respecto a los otros dos fluidos (Letra B, ambos). Esta diferencia permite expresar que desde el punto de vista técnico, el mejor comportamiento lo presentó el fluido Vassa, porque la viscosidad plástica debe ser mantenida lo más bajo posible para mejorar la hidráulica de la barrena y la tasa de penetración [27].

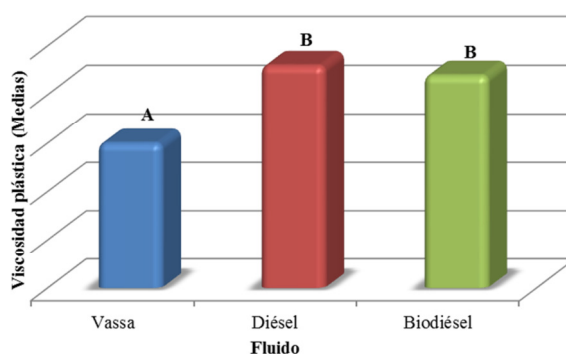


Figura 5: Prueba de Friedman para la viscosidad plástica de los fluidos Vassa, Diésel y Biodiésel para una densidad de 1437,92 kg/m³ (Medias con letras diferentes expresan diferencia estadística significativa).

Otra propiedad en estudio fue el punto cedente, se obtuvieron valores entre 5,5 Pa y 7 Pa (Tabla 6) para los fluidos formulados con aceite Vassa, diesel y biodiésel de palma aceitera.

TABLA 6 – VALORES PROMEDIOS DEL PUNTO CEDENTE PARA LOS FLUIDOS FORMULADOS A 1437,92 kg/m³, CON FASES CONTINUAS DE ACEITE VASSA, DIESEL Y BIODIÉSEL

Propiedad	Vassa	Diésel	Biodiésel
Punto cedente (Pa)	5,5	7	6

Estadísticamente no hubo diferencias significativas entre los fluidos (Letras iguales, A) (Figura 6), No obstante, los fluidos con puntos cedentes muy bajos no suspenderán el material densificante, pero es posible que los fluidos con altos puntos cedentes tampoco suspendan el material densificante [26]. En este sentido, se considera como mejor comportamiento, el valor obtenido por el fluido formulado con biodiesel.

Con respecto a los geles, los tres fluidos presentaron geles con diferencia entre el valor del gel inicial y final, denominados crecientes y además frágiles (Tabla 7).

Estadísticamente, tanto para los geles a los 10 s como para los geles a los 10 min, no hubo diferencia estadística significativa (Letras iguales, A), entre el fluido Vassa y el fluido con biodiésel, pero estos si difirieron del fluido con diesel (Letra B) (Figura 7). Los geles deben mantenerse en valores que sean lo suficientemente bajos, como para: facilitar el asentamiento de los sólidos indeseables, disminuir el efecto de suabeo al sacar tubería y lograr el buen funcionamiento de las bombas del taladro [27], por lo que técnicamente el mejor comportamiento es de los fluidos formulados con Vassa y biodiésel.

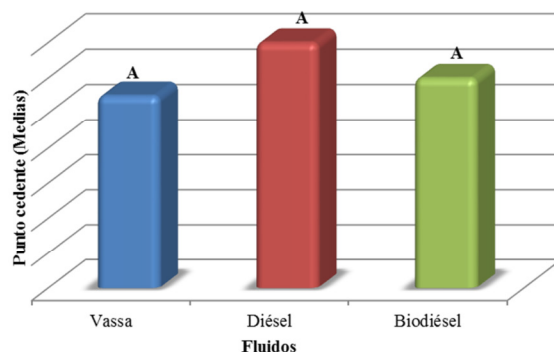


Figura 6: Prueba de Friedman para el punto cedente de los fluidos Vassa, diésel y biodiésel para una densidad de $1437,92 \text{ kg/m}^3$ (Medias con letras diferentes expresan diferencia estadística significativa).

TABLA 7 - VALORES PROMEDIOS DE LOS GELES A 10 s Y 10 min PARA LOS FLUIDOS FORMULADOS A $1437,92 \text{ kg/m}^3$, CON FASES CONTINUAS DE ACEITE VASSA, DIESEL Y BIODIÉSEL

Propiedad		Vassa	Diésel	Biodiésel
Geles (Pa)	10 s	2,5	3,5	2,5
	10 min	4	5	4

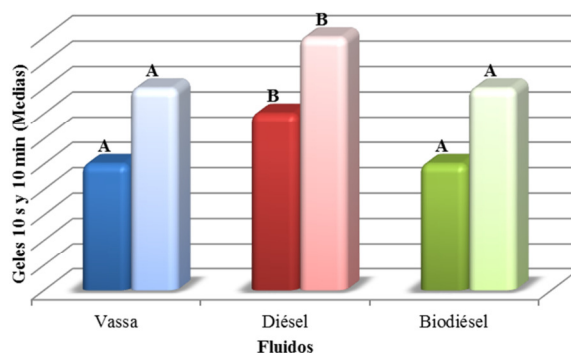


Figura 7: Prueba de Friedman para los geles a 10 s y 10 min de los fluidos Vassa, diésel y biodiésel para una densidad de $1437,92 \text{ kg/m}^3$ (Medias con letras diferentes expresan diferencia estadística significativa).

El filtrado presentado por los fluidos estuvo comprendido en un rango entre $3 \text{ cm}^3 / 30 \text{ min}$ a $6 \text{ cm}^3 / 30 \text{ min}$ (Tabla 8). Este tipo de gel para los fluidos en estudio, proporciona una excelente capacidad de suspensión y previene el hundimiento adverso de los sólidos.

TABLA 8 - VALORES PROMEDIOS DEL FILTRADO PARA LOS FLUIDOS FORMULADOS A $1437,92 \text{ kg/m}^3$, CON FASES CONTINUAS DE ACEITE VASSA, DIESEL Y BIODIÉSEL

Propiedad	Vassa	Diésel	Biodiésel
Filtrado ($\text{cm}^3 / 30 \text{ min}$)	5	6	3

Estadísticamente se detalla en la figura 8, que existen diferencia estadística significativa entre los fluidos. El fluido formulado con biodiésel (Letra A) difiere su comportamiento con respecto a los fluidos formulados con Vassa y diesel (Letra B ambos). El filtrado de los fluidos base aceite debe ser cero o lo más cercano a él, por lo que el fluido con biodiésel es el que presentó mejor comportamiento.

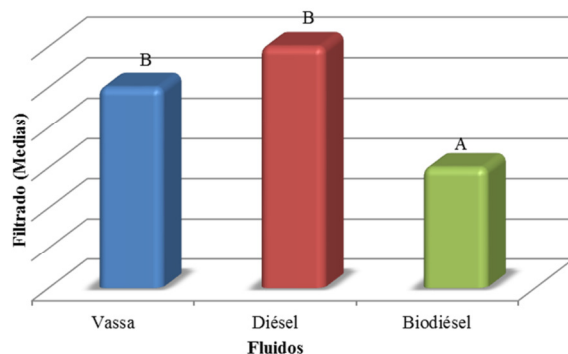


Figura 8: Prueba de Friedman para el filtrado de los fluidos Vassa, Diésel y Biodiésel para una densidad de $1437,92 \text{ kg/m}^3$ (Medias con letras diferentes expresan diferencia estadística significativa).

De las cuatro propiedades estudiadas, se demostró estadísticamente que el biodiesel presentó un buen comportamiento. Este no difiere del fluido Vassa en comportamiento en las propiedades de punto cedente y tixotropía, difirió positivamente de los fluidos Vassa y diésel en el filtrado, y en la única propiedad donde no fue el mejor, fue en la viscosidad plástica. Esto lo hace competitivo a nivel de laboratorio para ser empleado como fluido de perforación con respecto a los otros dos fluidos analizados.

Finalmente, con respecto a la variación de las propiedades físicas al modificar la temperatura, en la figura 9 se observa, que entre $121,1 \text{ }^\circ\text{C}$ y $148,8 \text{ }^\circ\text{C}$ las curvas que representan los esfuerzos de cortes para las distintas tasas de corte (L600, L300, L200, L100, L6 y L3) tiende al aumento. El comportamiento descrito indica que el biodiésel obtenido a partir del aceite crudo de palma sufre una degeneración térmica como consecuencia del aumento de los esfuerzos de corte. Para las temperaturas entre $93,3 \text{ }^\circ\text{C}$ y $121,1 \text{ }^\circ\text{C}$ se detalla un comportamiento relativamente estable del esfuerzo de corte para las lecturas de L600 y L300, pero por debajo de L200 (color verde) incluyéndolo, se evidencia un decremento del esfuerzo desde la mayor temperatura hacia la menor temperatura. De acuerdo a lo observado se puede expresar a la temperatura de $148,8 \text{ }^\circ\text{C}$, a la cual se presenta una descomposición del fluido, notándose por su relevante cambio en la tendencia de las lecturas.

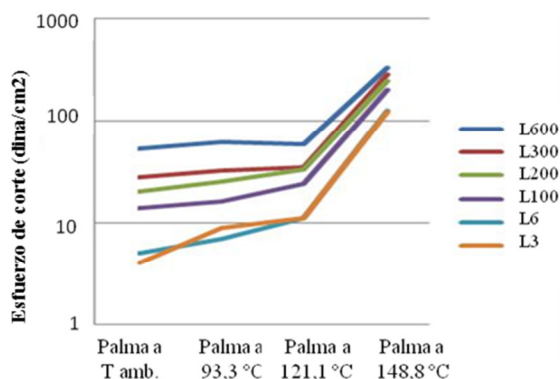


Figura 9: Esfuerzo de corte para el fluido palma (Biodiésel) al variar la temperatura.

La variación de los esfuerzos de corte como consecuencia de la disminución e incremento de la temperatura base ($121,1 \text{ }^\circ\text{C}$), afectaron por ende las propiedades físicas del fluido (Tabla 9). Al reducir la temperatura a $93,3 \text{ }^\circ\text{C}$, se observa que todas las propiedades están dentro del rango establecido por la norma de calidad empleada [24], solo la viscosidad plástica y el punto cedente estuvieron fuera de rango, su disminución posiblemente se debió al inicio de un proceso de floculación de la arcilla.

Se divide en la Tabla 9, que cuando la temperatura se incrementó, todas las propiedades físicas en estudio excepto el punto cedente están fuera de rango. Sobresale que existe un aumento en la viscosidad plástica y el punto cedente, esto normalmente está asociado a las arcillas reactivas. Igualmente los geles presentados son planos, comportamiento normalmente presente en los fluidos viscoelásticos y no en los fluidos bentoníticos como es el caso. Con respecto al filtrado también hubo un incremento en la propiedad, presentando un aumento del 300% con respecto a la temperatura

anterior. Al aumentar la temperatura, se encontraron sólidos generados por la gelatinización de los ácidos grasos, los cuales son producto de la descomposición térmica del biodiésel.

TABLA 9 - PROPIEDADES DEL FLUIDO PALMA (BIODIÉSEL) CON VARIACIÓN DE TEMPERATURA

Propiedades		93,3 °C	121,1 °C	148,8 °C	Rango
Viscosidad plástica (Pa.s)		0,029	0,023	0,035	0,013-0,0026
Punto cedente (Pa)		3	6	10	5-10
Geles (Pa)	10 s	3,5	3	6	2-3,5
	10 min	4,5	4	6,5	3,5-6
Filtrado (cm ³ /30min)		3	3	9	≤ 6

La investigación mejoró los resultados del trabajo previo donde se empleó biodiésel de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) [14] como base aceite para el desarrollo de fluidos de perforación, contrario a otros trabajos que lo emplearon pero como una emulsión inversa [4], [13] basados en el supuesto de que este tipo de fluido es beneficioso para la eficiencia de la perforación. No obstante, a pesar de no lograr un buen desempeño a la mayor temperatura de prueba, los resultados se consideran buenos y prometedores para investigaciones futuras, porque la gran ventaja que se tiene al aplicar este tipo de fluido es la obtención de un fluido de perforación no tóxico y biodegradable aplicable para ecosistemas altamente sensibles como pantanos, selvas y costa afuera [4].

4. CONCLUSIONES

De acuerdo al estudio de espectroscopia de infrarrojo (IR), se obtuvo un biodiésel que presentó grupos funcionales típicos de los biodiésels de palma aceitera (*Elaeis guineensis*), el cual cumplió con los parámetros establecidos por la norma que rige la calidad de los biodiésels, por lo que el esquema propuesto en la metodología para su obtención se considera aceptable.

Se demostró que el proceso empleado para obtener el biodiésel de palma aceitera aplicando conjuntamente metanolisis básica y ácida, mejoró las propiedades físicas del fluido de perforación formulado en comparación con los fluidos base biodiésel comerciales de soya y palma aceitera de investigaciones previas [14]. En dicho trabajo los autores demostraron que el fluido a base de soya era el que presentaba mejores propiedades físico-químicas en comparación con el fluido de palma aceitera, en la presente investigación se logró un comportamiento del fluido de palma aceitera similar al de un fluido comercial Vassa.

Lo descrito, quedó ratificado estadísticamente, demostrándose que el fluido formulado con biodiésel de palma aceitera presentó un comportamiento idóneo de las propiedades físicas en estudio, que no difieren del fluido formulado con aceite Vassa (letras iguales) y si difieren pero de manera positiva con el fluido base diésel (letras distintas). Aunque en el filtrado mostró diferencias positivas con ambos debido a que en esta presentó una reducción mayor de la propiedad respecto a los otros fluidos.

A pesar de mejorar las propiedades del biodiésel, no se logró que este funcione a temperatura de 148,9 °C al igual que en los trabajos previos, por lo que este es apto solamente para la perforación de fases someras (menor a 914,4 m (3000 pies)) e intermedias (entre 914,4 m y 1524 m (5000 pies)). Para contrarrestar la degradación térmica del fluido de perforación 100% natural a partir de aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis*), sería importante conocer el efecto o interacción de éste con los aditivos mediante pruebas de compatibilidad.

Se sugiere en trabajos futuros aplicar métodos que disminuyan la presencia de triglicéridos observados en la espectroscopia de Infrarrojo (IR) del biodiésel en 1743 cm⁻¹, para eliminar la presencia de ácidos grasos que se gelatinizan producto de la descomposición térmica del biodiésel al aumentar la temperatura de 121,1 °C a 148,8 °C. Otra posible causa de este comportamiento es debido a grupos ester presentes en los metilesteres del biodiésel. Por lo que se sugiere otros métodos para evitar que los esterres (triglicéridos o metilesteres) se transformen a ácidos.

REFERENCIAS

- [1] W. Haitang, Z. Junhua, W. Qin, Z. Jilu y Z. Jianan, «Transesterification of soybean oil biodiesel using zeolite supported CaO as strong base catalysts,» *Fuel Processing Technology*, n° 109, pp. 13-18, 2013.
- [2] M. Olutoye y B. Hameed, «Production of biodiesel fuel by transesterification of different vegetable oils with methanol using Al₂O₃ modified MgZnO catalyst,» *Bioresource Technology*, n° 132, pp. 103-108, 2013.
- [3] C. Rivas, J. Rondón, H. Meléndez, C. Lugo, L. Belandría, A. Uzcátegui, H. Del Castillo, P. Rodríguez y S. Gonzales, «Transesterificación de aceite de palma en biodiesel utilizando como catalizador un oxido mixto

- proveniente de hidrotalcita (Mg/Al),» *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, n° 3, 2017.
- [4] F. Benavides, J. Quintero y E. Ariza, «Estudio de factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa,» *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, vol. 9, n° 1, pp. 57-65, 2011.
- [5] A. González, I. Jiménez, M. Susa, S. Restrepo y J. Gómez, «). Biocombustibles de Segunda Generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes,» *Revista de Ingeniería*, vol. 28, n° 1, pp. 70-82, 2008.
- [6] P. Bejumea, J. Agudelo y L. Corredor, «Biodiesel de aceite de palma: alternativa para el desarrollo del país y para la autosuficiencia energética nacional,» *Revista Facultad de Ingeniería*, n° 28, pp. 50-61, 2003.
- [7] L. Gao, G. Teng, G. Xiao y R. Wei, «Biodiesel from palm oil via loading KF/Ca-Al. Hydrotalcite catalyst,» *Biomass and Bioenergy*, n° 34, pp. 1283-1288, 2010.
- [8] S. Rincón y D. Martínez, «Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria,» *Palmas*, vol. 30, n° 2, pp. 11-24, 2009.
- [9] E. Mora y J. Rojas, «Los cultivos líderes de la agricultura venezolana (1984-2005),» *Agroalimentaria*, n° 25, pp. 33-44, 2007.
- [10] Y. Liu, E. Lotero, J. Goodwin y X. Mo, «Transesterification of poultry fat with methanol using Mg–Al hydrotalcite derived catalysts,» *Appl. Catal. A: Gen*, n° 331, p. 138–148, 2007.
- [11] G. Castellar, E. Angulo y B. Cardozo, «Transesterification vegetable oils using Heterogeneous catalysts,» *Prospect*, vol. 12, n° 2, pp. 90-104, 2014.
- [12] A. Demirbas y H. Kara, «New options for conversion of vegetable oils to alternative fuels,» *Energy Source Part. A*, n° 28, p. 619–626, 20206.
- [13] W. Li, X. Zhao, Y. Ji, H. Peng, Chen., L. Liu y X. Han, «Investigation of Biodiesel-Based Drilling Fluid, Part 2: Formulation Design, Rheological Study, and Laboratory Evaluation,» *SPE Journal*, pp. 1-15, 2016.
- [14] R. Vega, G. Aguilera y M. Afanador, «Formulación de Fluidos 100% Aceite Naturales de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) y soya (*Glycine max*) para fases intermedias de 12 ½ pulgadas,» *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, vol. 30, n° 2, pp. 1-15, 2017.
- [15] J. Correia, M. García, G. Godoy y R. Vega, «Formulación de un fluido de perforación base dieles de bajo impacto ambiental,» *Boletín de Geología*, vol. 37, n° 2, pp. 75-82, 2015.
- [16] W. Camargo, F. Ramos, J. Carrasquero y J. Arocha, «Aplicación de Campo de aceite de baja toxicidad en pozos de alto riesgo. En S. Petróleos de Venezuela,» de *IV Seminario de fluidos de perforación y completación*, Caracas, 2001.
- [17] P. Benjumea, J. Agudelo S. y G. Cano, «Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel,» *Scientia Et Technica*, vol. X, n° 24, pp. 169-174, 2004.
- [18] Internacional Organization for Standardization [ISO], «Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de acidez y de la acidez ISO 660,» Ginebra, 2009.
- [19] American Society for Testing and Materials [ASTM], «Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer. ASTM D2196,» West Conshohocken, 2015.
- [20] American Society for Testing and Materials [ASTM], «Standard Specification for Biodiesel Fuel (B100) Blend Stock for Distillate Fuels. ASTM D6751 - 03,» West Conshohocken, 2005.
- [21] American Society for Testing and Materials [ASTM], «Standard Test Method for Flash Point by the Equilibrium Method With a Closed-Cup Apparatus. ASTM D-92,» West Conshohocken., 2014.
- [22] American Society for Testing and Materials [ASTM], «Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure. ASTM D86,» West Conshohocken, 2007.
- [23] American Petroleum Institute [API], «Recommended practice for field testing oil based fluids drilling fluids. API RP 13B-2,» Washington D. C., 2007.
- [24] Samán Tecnología Integral en Petróleo, «Manual de calidad de fluidos de perforación. Norma ISGC-8.0.1-1-00,» Maturín, 2007.
- [25] F. Cardeño, L. Ríos y F. A., «Producción de biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea,» *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, n° 51, pp. 88-93, 2010.
- [26] Baker Hughes, *Manual de Ingeniería de fluidos*, Houston, 2005.
- [27] A. Prieto, *Tecnología de los fluidos de perforación. Manual técnico*, Maracaibo: Apoca, 2007.